

УДК 669.162.12:622.782:536.242

Е. Г. Шаврин, Б. П. Юрьев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА В СЛОЕ ОБЖИГАЕМЫХ ОФЛЮСОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ОБЖИГА

Аннотация

Разработана методика приближенного расчета теплообмена в слое офлюсованных железорудных окатышей на ленте конвейерной машины, основанная на закономерностях передачи теплоты в неподвижном слое. Установлено, что на продолжительность окислительного обжига железорудных окатышей влияют условия теплообмена, распределение температур газа и материала по высоте слоя, физико-химические процессы (окисление магнетита, разложение карбонатов и другие). Большая часть из них протекает с выделением или поглощением теплоты. В результате расчет теплообмена в обжигаемом слое окатышей представляет сложную задачу. Показано, что получить решение системы уравнений, описывающих теплообмен в слое окатышей, в общем случае, не представляется возможным, а можно лишь приближенно с использованием различных методов аппроксимации краевых условий и параметров задачи, либо численным методом с помощью ЭВМ, который и рассмотрен в работе. Составлена программа расчета теплообмена в слое окатышей применительно к режиму обжига их на конвейерной машине.

Приведенная методика позволяет определять оптимальную продолжительность процесса обжига окатышей с учетом влияния на теплообмен различных факторов.

Ключевые слова: теплообмен, методика расчета, железорудные окатыши, физико-химические процессы, слой, конвейерная машина, обжиг, параметры, численные методы, задача, режим работы.

Abstract

The developed method for the approximate calculation of heat transfer in the layer of iron ore pellets on the conveyor belt of the machine based on the laws of heat transfer in a fixed bed. It is established that the duration of oxidative firing of iron ore pellets is influenced by heat exchange conditions, the distribution of gas and material temperatures by layer height, physico-chemical processes (magnetite oxidation, carbonate decomposition, etc.). Most of them proceed with the release or absorption of heat. As a result, the calculation of heat transfer in the annealed layer of pellets is a complex problem. It is shown that it is impossible to obtain a solution of a system of equations describing heat transfer in a layer of pellets in General, but it is possible only approximately with the use of various methods of approximation of boundary conditions and parameters of the problem, or by a numerical method using a computer, which is considered in the work. The program of calculation of heat exchange in the layer of pellets in relation to the mode of firing them on the conveyor machine.

The given technique allows to determine the optimal duration of the process of burning pellets taking into account the influence of various factors on the heat exchange.

Key words: heat exchange, calculation method, iron ore pellets, physico-chemical processes, layer, conveyor machine, firing, parameters, numerical methods, problem, mode of operation.

В работе [1] приведено аналитическое решение задачи о нагреве слоя материала движущимся газом при произвольно заданных начальной температуры материала и изменении во времени температуры газа на входе в слой. При этом теплофизические свойства материала и газа, а также коэффициент теплопередачи приняты неизменными. Однако на процесс теплообмена существенное влияние оказывают изменение теплофизических свойств материала и газа [2], и различное развитие химических реакций окисления магнетита, разложение карбонатов и другие [3-5] в массе куска зависимости от температуры термообработки материала. Учет химических реакций обычно производится при помощи метода кажущейся теплоемкости [6], сущность которого заключается в том, что источники(стоки) теплоты распределены равномерно по высоте слоя, постоянны во времени и включены в теплоемкость материала. Более строгим является расчет, в котором теплофизические свойства материалов учитывают кинетику протекания реакций окисления магнетита, разложение карбонатных соединений [5]. Пример такого расчета применительно к обжигу офлюсованных железорудных окатышей на конвейерных машинах Соколовско-Сарбайского ГОКа дается в настоящей работе.

Исходная система дифференциальных уравнений для определения температуры газа и неподвижного слоя материала принята по работе [7]. Граничные условия с учетом реальных режимов зоны обжига конвейерной машины сводятся к следующему:

$$\mathcal{V}_0 = \mathcal{V}_{n=0} = const, \quad t_{\tau=0} = t(h), \quad (1)$$

где \mathcal{V}_0 – температура газа-теплоносителя на входе в слой, °C; h – координата высоты, м; t – температура материала в слое, °C; τ – координата времени, с.

При определении средней по массе температуры нагреваемого материала использовали суммарное тепловое сопротивление, учитывающее как процессы теплообмена между нагреваемым телом и средой, так и внутреннее тепловое сопротивление, зависящее от индивидуальных свойств самого тела [7]. Коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности материала определяли по методике [8]. Теплофизические параметры газа и материала, а также скорость газового потока принимаем в виде функций температуры:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Gamma} &= \lambda_{\Gamma}(\mathcal{V}); C_{\Gamma} = C_{\Gamma}(\mathcal{V}); V_{\Gamma} = V_{\Gamma}(\mathcal{V}); C_{\text{м}} = C_{\text{м}}(t); \\ \lambda_{\text{м}} &= \lambda_{\text{м}}(t); \omega = \frac{\omega_0 \mathcal{V}}{273}, \end{aligned}$$

где λ_{Γ} и $\lambda_{\text{м}}$ – соответственно коэффициенты теплопроводности газа и материала, Вт/(м °C);

C_{Γ} и $C_{\text{м}}$ – теплоемкости газа и материала, кДж/(м³ °C); ω_0 – скорость газового потока при нормальных условиях, м/с; V_{Γ} – коэффициент кинематической вязкости газа, м/с.

Задачу решали методом конечных разностей, рассматривая изменения температуры \mathcal{V} при переходе из точки $i-1$ в точку i по высоте слоя и изменение температуры t материала при увеличении времени обработки от $n-1$ до n . Для определения температуры материала газа в данной точке необходимо знать распределение этой температуры по высоте слоя в момент времени $\tau=0$ и величину этих

параметров на верхнем горизонте слоя $h=0$ в любой текущий момент времени. Эти величины определяли из граничных условий (1) и интегрирования независимых дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен в слое [6]:

$$\mathcal{V}_{i,n} = \mathcal{V}_{i-1,n} - \frac{k_v z \Delta h}{4C_r \omega_0 + k_v \left[\Delta h + \frac{c_r \omega_0 \Delta \tau}{(1-m)c_m \rho_m} \right]}; \quad (2)$$

$$t_{i,n} = t_{i,n-1} - \frac{c_r \omega_0}{(1-m)c_m \rho_m} \frac{\Delta \tau}{\Delta h} (\mathcal{V}_{i,n} - \mathcal{V}_{i-1,n}),$$

где k_v – суммарный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³ °С); m – порозность слоя; ρ_m – плотность материала, кг/м³;

$$Z = \mathcal{V}_{i,n-1} + \mathcal{V}_{i-1,n-1} + 2\mathcal{V}_{i-1,n} - (t_{i-1,n-1} + t_{i-1,n} + 2t_{i,n-1})$$

Систему уравнений (2) решали итерационным методом. Численное решение задачи проводим на ЭВМ. Полученное решение использовали для анализа работы зоны обжига конвейерной машины ОК–108. Температуру газа-теплоносителя в зоне обжига приняли раной 1275 °С. Момент окончания нагрева материала фиксировали по достижении нижним горизонтом слоя температуры 1100 °С.

Из рис. 1 видно, что при прочих одинаковых условиях начальное распределение температуры существенно влияет на теплообмен в слое (различие в температуре нижних горизонтов через 5 мин достигает уже 200 °С). Отсюда становится понятной необходимость учета начального распределения температуры газа и материала.

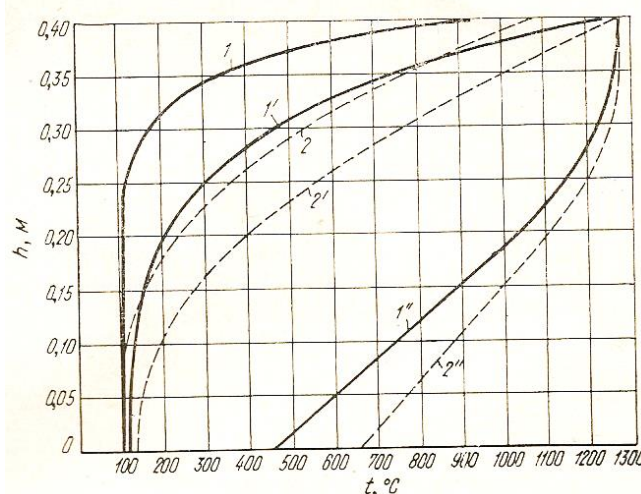


Рис. 1. Распределение температуры в слое окатышей в зависимости от ее начального распределения (1) и (2)

на входе в зону обжига при различном времени выдержки:

$\tau=1$ мин (1') и (2'), $\tau=5$ мин (1'') и (2''), и одинаковой скорости фильтрации слоя ($\omega_{\phi} = 1,0$ м/с)

Анализ влияния скорости фильтрации ω_{ϕ} на продолжительность его обработки показывает, что с увеличением скорости фильтрации сокращается время достижения нижним горизонтом слоя температуры 1100 °С. Для того, чтобы нижний горизонт слоя высотой 0,25 м (близкий к высоте слоя на конвейерных машинах) прогрелся до температуры 1100 °С при скорости фильтрации 0,6 м/с при первом варианте начального распределения температуры материала на входе

в зону обжига, требуется 10,40 мин, а при скоростях фильтрации 1,0 и 1,5 м/с – соответственно 6,65 и 4,87 мин. При втором варианте начального распределения температур потребуется соответственно 9,00; 5,90 и 4,12 мин.

Влияние высоты слоя на продолжительность термообработки окатышей аппроксимировали выражением:

$$\tau = ah + b, \quad (3)$$

где a и b – постоянные коэффициенты, значения которых, рассчитанные для реальных условий, представлены в таблице.

Таблица

Значения коэффициентов a и b

Скорость фильтрации, м/с	Варианты начального распределения температуры материала			
	1		2	
	a	b	a	b
0,6	1,36	34,90	0,60	34,90
1,0	1,36	21,10	0,60	21,10
1,5	1,36	13,90	0,60	13,90

Из таблицы видно, что для принятых выше условий расчета коэффициент a не зависит от скорости фильтрации слоя и определяется начальным (перед зоной обжига) распределением температуры материала. В свою очередь коэффициент b зависит от скорости фильтрации слоя и не зависит от изменения начального распределения температуры материала. Таким образом, коэффициенты a и b характеризуются различными параметрами процесса термообработки окатышей в неподвижном слое.

Зная продолжительность термообработки, можно определить удельную производительность Π зоны обжига машины ленточного типа [8] по формуле

$$\Pi = \frac{h(1-m)\rho_m 60}{\tau}. \quad (4)$$

Расчет по этому соотношению (рис. 2) показывает, что при всех значениях скорости фильтрации с увеличением высоты слоя удельная производительность зоны обжига возрастает, особенно при малых значениях высоты слоя, вследствие более низкой продолжительности пребывания окатышей в зоне. Если высота, слоя больше 0,25–0,30 м, то приращение времени термообработки окатышей превышает приращение толщины слоя, что обуславливает замедление интенсификации процессов теплопереноса и, следовательно, производительность зоны обжига.

Выводы. С учетом реальных режимов работы зоны обжига на конвейерной машине приняты граничные условия и итерационным методом решена система дифференциальных уравнений, описывающих теплообмен в не подвижном слое. Численное решение задачи проведено с помощью ЭВМ. Особенность разработанной методики в том, что она позволяет производить расчет окислительного обжига офлюсованных окатышей с учетом кинетики процессов, протекающих в окатышах, а также учитывать начальное распределение температуры материала, влияние скорости фильтрации и высоты слоя на степень завершенности процессов.

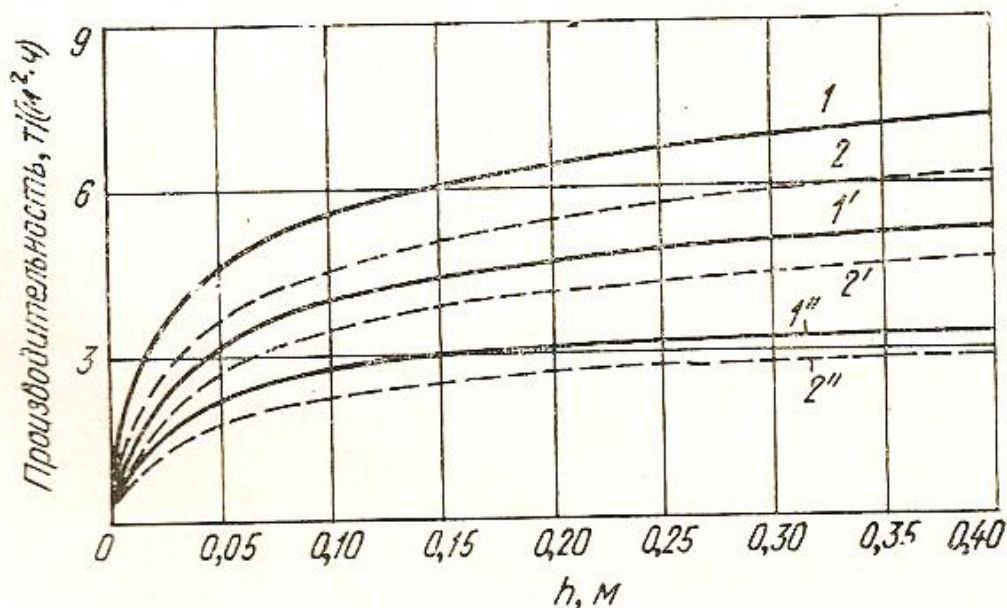


Рис. 2. Зависимость удельной производительности зоны обжига от высоты слоя и скорости газа-теплоносителя при скоростях 1,5 (1) и (2); 1,0 (1') и (2') и 0,6 м/с (1'') и (2'') для двух вариантов начального распределения температуры (см. рис. 1)

Список использованных источников

1. Тимофеев В.Н., Шкляр Ф.Р., Раева М.В. Закономерности нагрева неподвижного слоя. В сб. научных трудов ВНИИМТ. – М.: Металлургия, 1970. №23. С. 180-194.
2. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин, О.В. Матюхин, О.Ю. Шешуков. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
3. Юрьев Б.П., Гольцев В.А. Исследование процесса окисления магнетита // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. №10. С. 735-739.
4. Юрьев Б.П., Спирин Н.А. Результаты исследования процесса окисления железорудных окатышей // Сталь. 2011. №5. С. 9-12.
5. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, Л.И. Леонтьев, Б.П. Юрьев / Под ред. академика РАН Л.И. Леонтьева. – Екатеринбург: МИЦ, 2015. – 335 с.
6. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Сучков В.Д. Теплообмен в шахтных печах. – М.: Металлургиздат, 1957. – 280 с.
7. Теплотехника окучивания железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский и др. – М: Металлургия, 1970. – 342 с.
8. Теплотехнические расчеты агрегатов для окучивания железорудных материалов / С.В. Базилевич, В.М. Бабошин, Я.Л. Белоцерковский [и др.]. – М: Металлургия, 1979. – 208 с.